

Neue Entwicklungen in der Meßtechnik

Kose, Volkmar

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1995 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.91-95



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

VOLKMAR KOSE, Braunschweig

Neue Entwicklungen in der Meßtechnik

Braunschweig, 10.2.1995*

In unserer modernen Gesellschaft, die durch die Fortschritte in den Naturwissenschaften, der Technik und durch weltweiten Handel geschaffen worden ist, hat das Messen eine herausragende Bedeutung. Jede Ware in kleinen oder riesigen Mengen, die ihren Besitzer wechselt – ob Lebensmittel oder elektrische Energie – muß gemessen werden. Selbst der Arzt stützt sich bei der Diagnose oder der Therapie auf Meßwerte, die Aussagen über unseren gesundheitlichen Zustand machen oder die Dosis festsetzen. Das Messen ist also zu einem ganz normalen Bestandteil unseres Lebens geworden.

Die erhöhten Anforderungen an Genauigkeit insbesondere im „High-Tech“-Bereich und an die Vergleichbarkeit von Messungen setzen genaue und allgemein gültige Einheiten voraus. Um diesen beiden Ansprüchen gerecht werden zu können, versucht man heute die Einheiten auf Fundamentalkonstanten in der Physik zurückzuführen. Soweit wir wissen, sind diese nämlich als unabhängig vom Ort und von der Zeit anzusehen und stellen, wenn immer das in der Praxis mit geringer Meßunsicherheit gelingt, ideale Maße in Naturwissenschaft und Technik dar.

Bekanntlich beruhen alle Messungen in unserem SI-Einheitensystem auf sieben Basiseinheiten, die in dem Bild 1 wiedergegeben sind. Die drei unabhängigen Basiseinheiten Kilogramm, Sekunde und Kelvin werden durch das Kilogramm-Prototyp seit 1889, seit 1967 durch die Atomuhr und durch die Tripelpunktzelle des Wasser in den metrologischen Staatsinstituten dargestellt. Relativ neu sind die Versuche, das Meter, das Mol und das Ampère auf Fundamentalkonstanten zurückzuführen. Im folgenden soll kurz über den gegenwärtigen Stand dieser Entwicklung berichtet werden.

1. Realisierung des Meter durch Frequenzmessung sichtbarer Laserstrahlung

Die Einheit des Meter war ursprünglich vom Umfang der Erde abgeleitet worden als der zehnmillionste Teil eines Erdmeridian-Quadranten. Die Verkörperung dieser Einheit geschah 1889 durch einen Meter-Prototyp aus Platin-Iridium. Unsere heutige gültige Meter-Definition wurde 1983 beschlossen. Seit dieser Zeit ist das Meter durch die Länge der Strecke definiert, die Licht im Vakuum während der Dauer von $(1/299\,792\,458)$ Sekunden durchläuft. Sie ist also mit der Definition der Zeit verknüpft. Gleichzeitig ist der

* Zusammenfassung eines Vortrags vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

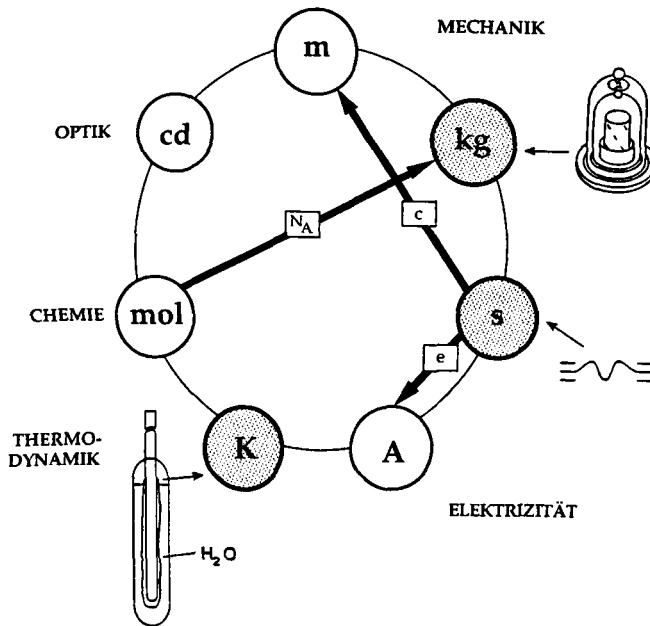


Bild 1:

Die sieben Basiseinheiten Meter (m), Kilogramm (kg), Sekunde (s), Ampère (A), Kelvin (K), Mol (mol) und Candela (cd) des internationalen Einheitensystems für Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke. Drei Basiseinheiten kg, s, K sind von den anderen Einheiten meßtechnisch unabhängig. Darüber hinaus sind einige Anwendungsfelder aufgeführt, für die bestimmte Basiseinheiten wichtig sind. Die drei Fundamentalkonstanten Lichtgeschwindigkeit c , Avogadrokonstante N_A und die elektrische Elementarladung e sind heute von zentraler Bedeutung für die Realisierung des Meter, Mol und des Ampère.

Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$, d. h. ohne Unsicherheit, festgelegt.

Nach dieser Definition der Längeneinheit können Entfernungen zwischen zwei Meßpunkten mit Hilfe der Zeit bestimmt werden, in der das Licht von einem Punkt zum anderen läuft. Derartige Zeitmessungen eignen sich für große Entfernungen, z. B. zwischen Erde und Mond. Für genaue Messungen im Laboratorium hingegen verwendet man interferentielle Methoden, bei denen die zu messende Länge mit der bekannten Wellenlänge λ eines Lasers mit sichtbarer Strahlung verglichen wird. Einer zu messenden Länge von 10 mm entsprechen dann 20 000 Wellenlängen, wenn $\lambda = 0,5\text{ }\mu\text{m}$ beträgt.

Um makroskopische Längen in Vielfachen von λ genau messen zu können, bedarf es einer genauen Kenntnis des λ -Wertes. Dies ist kürzlich in der PTB mit einer relativen Unsicherheit von kleiner 10^{-12} gelungen. Wegen des definierten Wertes der Lichtgeschwindigkeit bedeutet eine Wellenlängenmessung praktisch eine Frequenzmessung der Laserstrahlung. Um das Meter gemäß Bild 1 auf die Sekunde zurückzuführen, muß die

Atomuhrenfrequenz (≈ 9 GHz) mit der Frequenz der Laserstrahlung ($\approx 450\,000$ GHz) genau bestimmt werden. Gegenüber früheren Messungen konnte erstmals dieses Frequenzverhältnis von 50 000 durch phasenstarre Frequenzvervielfachung fehlerlos gemessen werden. Damit läßt sich heute das Meter gegenüber früheren Messungen mindestens 50mal genauer realisieren und erreicht damit die Unsicherheit der Sekunde.

2. Realisierung des Kilogramms auf der Grundlage der Avogadrokonstanten

Die Definition der Einheit der Masse gilt seit 1889 unverändert bis auf den heutigen Tag. Sorgfältig aufbewahrt im Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Sèvres bei Paris befindet sich das Urkilogramm, das per definitionem die Unsicherheit Null hat. Alle nationalen Kilogramm-Prototype werden durch genaue Wägungen periodisch etwa alle 30 Jahre an das Urkilogramm angeschlossen. Gasan- und -einlagerungen führen mit der Zeit zu Veränderungen des Kilogramm, die bis zu 50 Millionstel Gramm ($50\,\mu\text{g}$) betragen können. Dies ist sicher eine unbefriedigende Situation, die man im Begriff ist zu beseitigen.

Ziel der längerfristigen Bemühungen ist es, das Kilogramm gemäß Bild 1 auf Fundamentalkonstanten, d. h. über die Avogadrokonstante, zurückzuführen. Ohne auf die diffizilen Präzisionsmessungen einzugehen, soll hier nur der Grundgedanke erläutert werden.

Die Basiseinheit mol ist definiert als die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviel Einzelteilchen besteht wie Atome in 12 g des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind. D. h., daß gerade die in einem Mol befindliche Anzahl (entspricht der Zahl der Avogadrokonstante N_A) von Kohlenstoffatomen der Masse m_c benötigt werden, um eine makroskopische Masse von $M = 12$ g durch Wägung zu erzielen. Die Avogadrokonstante N_A sagt also aus, wieviel Atome sich in einem makroskopischen Volumen, dem Molvolumen, befinden. Das Meßproblem besteht darin, N_A auf relativ 10^{-8} oder sogar noch besser zu bestimmen.

In Bild 2 ist im Prinzip skizziert, wie die neue Darstellung des Kilogramm verwirklicht werden soll. Als Ausgangsmaterial nimmt man aus technologischen Gründen nicht Kohlenstoff, sondern Silicium, das extrem rein und in einkristalliner Form herstellbar ist. Da das Siliciumatom schwerer als das Kohlenstoffatom ist, ergibt sich für das Molvolumen eine Masse von $M = 28$ g. Die Aufgabe besteht nun darin, die Anzahl der Si-Atome eines Einkristalls genau zu ermitteln, der 28 g wiegt, um N_A zu erhalten. Selbst wenn es möglich wäre, ist eine Zählung einzelner Atome völlig auszuschließen, da sie nur in riesigen Zeitspannen zu bewältigen ist. Um jedoch in kürzeren Zeiten mit hoher Genauigkeit zum Ziel zu kommen, vermißt man zunächst das Volumen der Elementarzelle, d. h. den Gitterabstand der Siliciumatome und kennt damit die Anzahl der Si-Atome in diesem genau bekannten Elementarzellen-Volumen. Das bedeutet, daß ein Atomabstand in der Größenordnung von einem Milliardstel Meter (1 nm) auf mindestens 8 Stellen genau gemessen werden muß! Mißt man das gesamte Volumen (Molvolumen) des Siliciumein-

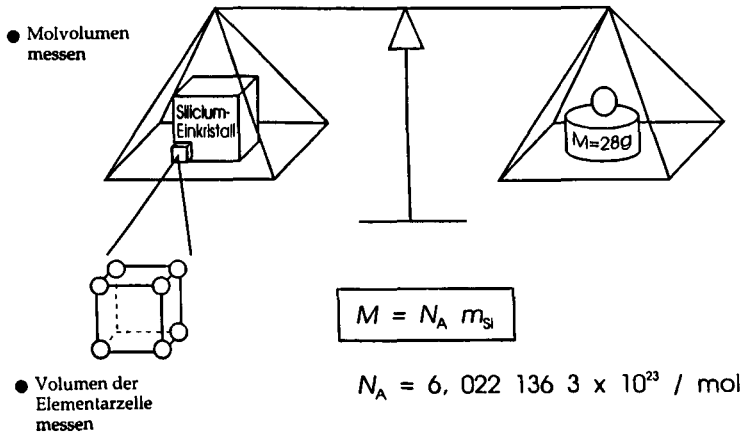


Abb. 2:
Neue Realisierung der Einheit Kilogramm

kristalls der Kantenlänge von etwa 10 cm ebenfalls auf mindestens 8 Stellen, d. h. auf 10^{-17} m, genau, so läßt sich bei regulärem Gitteraufbau ohne Fehlstellen und Verunreinigungen aus dem Volumenverhältnis von Molvolumen zu Elementarzellen-Volumen die Anzahl der Siliciumatome, d. h. die Avogadrokonstante ermitteln. Bisherige Ergebnisse, u. a. auch in der PTB, lassen in Kürze für die N_A -Bestimmung eine relative Unsicherheit von 1×10^{-7} erwarten, eine Größenordnung noch zu groß von dem gesteckten Ziel.

Sollte jedoch auf diesem Wege eines Tages eine weitere Steigerung der Meßgenauigkeit möglich sein, so würde das bisher gültige Artefakt Kilogramm-Prototyp durch einen Siliciumkörper bekannter Anzahl von Siliciumatomen ersetzt werden. Das Kilogramm würde somit auf atomarer Masse des Siliciums via Avogadrokonstante, d. h. dem Konversionsfaktor zwischen mikroskopischer und makroskopischer Materie, zurückgeführt sein. Dies wäre wahrlich ein meßtechnischer Meilenstein nach über 100 Jahren!

Sollte dies gelingen, so würden damit gleichzeitig erhebliche Fortschritte in Physik, Chemie und Technik erzielt sein. Das betrifft u. a. die Herstellung und Charakterisierung noch reineren Siliciums, die Rückführung in der Chemie auf SI-Einheiten, die Längenmessung an Normalen im Subnanometerbereich und die Bestimmung anderer Fundamentalkonstanten wie der Feinstrukturkonstanten auf der Basis der Avogadrokonstanten.

3. Realisierung des Ampère auf der Grundlage der Elementarladung des Elektrons

Bekanntlich führen bewegte elektrische Ladungen zu elektrischen Strömen. Normalerweise basieren elektrische Ströme auf einer Vielzahl von bewegten Elektronen und damit einer Vielzahl von transportierten elektrischen Ladungen. Um jedoch einen elek-

trischen Strom genauer Stromstärke I zu erzielen, muß man die Anzahl der transportierten Ladungen pro Zeit kennen. Dabei geht man neuerdings von nur einem Elektron mit der Elementarladung e ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ As) aus und transferiert es im Takte einer bekannten Frequenz f . Das Experiment muß nun so präpariert sein, daß dieser Transfer der einzige Vorgang für das Elektron mit der Ladung e ist. Dann läßt sich in der Tat eine elektrische Stromstärke über eine Fundamentalkonstante der Elementarladung e auf eine Frequenz der Atomuhr zurückführen gemäß $I = ef$ (siehe Bild 1).

Verwirklichen läßt sich dies durch einen elektrischen Kondensator, dessen Plattenabstand nur wenige Atomlagen groß ist. Durch Anlegen einer Wechselspannung bekannter Frequenz läßt sich somit ein kleiner Gleichstrom durch Tunnelung eines Elektrons genau erzeugen. Voraussetzung für diesen kohärenten Ladungstransfer ist es u. a., daß durch zu hohe Temperatur des Kondensators kein zusätzlicher Ladungsübergang im Kondensator erfolgt. Will man diesen Effekt ausschalten, so läßt sich das Experiment nur sinnvoll verwirklichen, wenn die Abmessungen der Kondensatorplatten einige Nanometer ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) betragen und die Temperatur bei einem Wert von 0,05 K, also in der Nähe des absoluten Nullpunktes, liegt.

Zur Zeit lassen sich mit derartigen Anordnungen elektrische Stromstärken von lediglich 10 pA, d. h. 10 billionstel Ampère, auf relativ 10^{-5} erzeugen. Ziel weiterer Untersuchungen ist es, den Strom wesentlich, d. h. auf etwa 1 A zu steigern, so daß relative Unsicherheiten von kleiner 10^{-8} möglich sein sollten. Zumal ein Tunnelement nur einen geringen Platzbedarf benötigt, besteht die Möglichkeit, eine Vielzahl von Tunnelementen parallel zu schalten, um dem angestrebten Ziel näher zu kommen. Derartige Untersuchungen, die u. a. auch in der PTB durchgeführt werden, setzen voraus, daß man die erforderliche Nanolithographie zur reproduzierten Herstellung solcher kleinsten Tunnelemente beherrscht.

Abschließend läßt sich feststellen, daß die beschriebenen Experimente, bei denen Einheiten im Meßwesen durch Rückführung auf Fundamentalkonstanten gekennzeichnet sind, die Metrologie, die Wissenschaft vom Messen, erheblich bereichern werden. Darüber hinaus werden sie in Physik und Technik zu neuen Erkenntnissen führen.

Prof. Dr. V. Kose
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100 · 38116 Braunschweig